

00000985

FERMENTATIONS MÉTHANIQUES
DE MACROPHYTES MARINS

S. LECLERCQ
E. TINE
E.S. DE SAINTE CLAIRE



CENTRE DE RECHERCHES **Océanographiques** UE DAKAR • TIAROYE

DOCUMENT SCIENTIFIQUE

N° 102

* INSTITUT SÉNÉGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES *

SEPTEMBRE 1985

FERMENTATIONS METHANIQUES DE MACROPHYTES MARINS

par

Stephane LECLERC⁽¹⁾, Emmanuel TINE⁽¹⁾ et
Emmanue SUISSE DI SAINTE CLAIRE⁽²⁾

R E S U M E

une importante biomasse algale s'échoue, chaque année, de novembre à juin, en certains endroits de la côte du Sénégal. Cette biomasse, qui n'est pas utilisée, contribue à la pollution des plages. C'est pour cela que les auteurs ont tenté, en utilisant des procédés de biotechnologie de valoriser cette biomasse par la filière biogaz-compost, la transformant en deux sous produits : un biogaz (combustible) et un compost à usage agronomique.

Le point de départ de cette recherche a consisté à trouver l'inoculum bactérien adapté à ce substrat et à la fermentation en eau de mer. Cet inoculum a été extrait de boues de mangroves. La microflore active a été progressivement adaptée au substrat algal, dans des réacteurs en discontinu, puis utilisée dans des digesteurs en continu de laboratoire et un pilote de 150 litres.

Les principaux résultats exposés dans cet article sont constitués par l'analyse de la composition algale, la **description** des procédés de fermentations en discontinu, puis en continu, et l'analyse des composts obtenus.

(1) Antenne ORSTOM de Microbiologie des fermentations (UR 601) à l'ENSUT ORSTOM BP 1386 Dakar (Sénégal).

(2) Technicien supérieur ORSTOM, en poste au CRODT-ISRA BP 2241 Dakar (Sénégal).

S U M M A R Y

A significant sea-weed biomass landed, each year, from november to june, in some parts of the senegalese sea shore. Such a biomass, non used, contributes to the beach pollution. So, assays were settled-up to valorise it by a biotechnical way, using methanogenic fermentative processes producing biogas and organic fertilizers.

First step of research was to fund an adaptated inoculate. It was extracted from tidal mangrove soils, and active microflora was progressively adapted to algal biomass in batch reactors, then used in continuous digestors to optimize biogas production.

Main reported results concerned sea-weed composition, batch fermentatives processes, assays on continuous digestors and fertilizers' composition.

T A B L E D E S M A T I E R E S

INTRODUCTION

1. CONTEXTE LOCALISATION, ESTIMATION DU VOLUME D'ALGUES

2. MATERIEL ET METHODES D'ANALYSES

2.1. Fermenteur de laboratoire en discontinu

2.2. Fermenteur de laboratoire en continu

2.3. Analyses des gaz

2.4. Analyses des acides gras volatils

2.5. Autres analyses

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Composition des algues

3.2. Sélection de L'innoculum

3.3. Fermentation discontinue des algues marines

3.4. Fermentation des algues en continu

3.5. Analyse du compost.

CONCLUSIONS

I N T R O D U C T I O N

D'importantes quantités d'algues marines s'échouent chaque année sur la "Petite Côte" du Sénégal, entre Dakar et Joal-Fadiouth, parfois sur une hauteur de 50 cm le long des plages.

Cette accumulation d'algues sur l'estran constitue une biomasse végétale non encore valorisée, et représente au contraire une gêne par les nuisances provoquées par leur décomposition naturelle (en baie de Hann par exemple).

Différentes filières de valorisation ont été envisagées comme la fabrication de compost ou l'extraction de composés utilisés en industries pharmaceutique ou alimentaire.

Un des buts de recherche de l'antenne de microbiologie ORSTOM de l'ENSUT à Dakar est de tester les possibilités de valorisation des déchets organiques par fermentation méthanique (la filière biogaz-compost) en passant par la recherche d'inoculum spécifiques. Ainsi nous avons lancé en collaboration avec le CRODT des essais de fermentation méthanique des algues.

Quelques recherches ont été réalisées dans le monde sur ce thème, notamment par RYTHER et al., 1980, aux Etats-Unis et par BROUARD, BORICS et SAUZE, 1982-83 en France (INRA, Narbonne).

Cependant ces essais peu nombreux fournissent peu de données sur la fermentation méthanique des algues : aucune n'a été réalisée sur les côtes d'Afrique de l'Ouest.

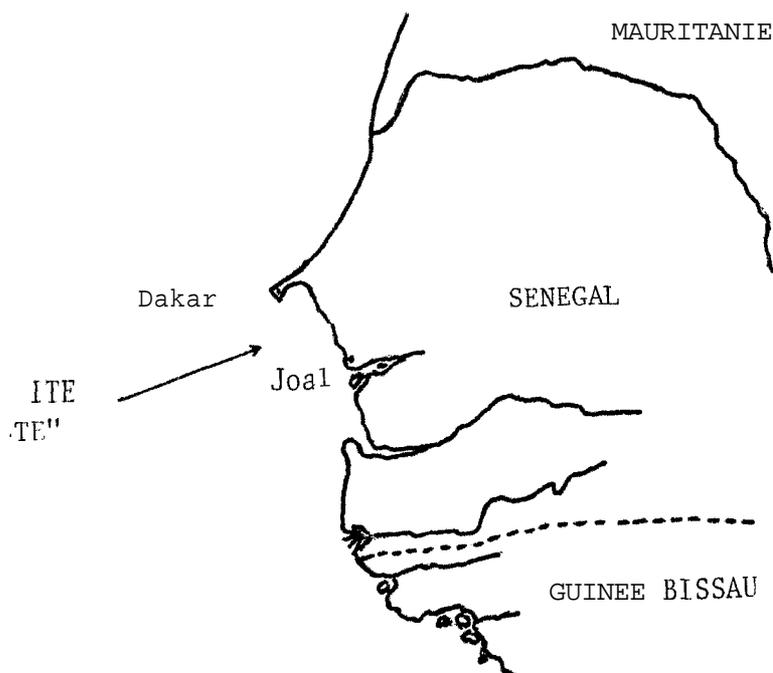
L'ensemble de nos recherches s'est déroulée en 4 phases, la dernière étant en cours de réalisation :

- 1) Sélection d'un inoculum spécifique capable de dégrader un mélange d'algues de caractéristiques constantes.
- 2) Essais de fermentation en discontinu sur des pilotes de laboratoire de 2,5 l.
- 3) Essai de fermentation en continu sur un pilote de laboratoire de 0,75 l.
- 4) Essai de fermentation en continu sur un pilote de 150 litres.

Ces pilotes de fermentation ont été mis au point et installé au CRODT. Ces essais nous ont permis, successivement, de sélectionner l'inoculum, de connaître la fermentescibilité des algues, les conditions optimales de travail, les rendements en biogaz et la qualité du compost obtenu.

1 . CONTEXTE , LOCALISATION , ESTIMATION D u V O L U M E D ' A L G U E S

Globalement, des algues s'échouent tout le long de la "Petite Côte" du Sénégal, entre Dakar et Joal, avec une période dominante entre décembre et juin.



Les quatre principales espèces rencontrées sur cette côte sont :

- *Ulva* **Lac tuca**
- *Cladophora* s.p.
- *Hypnea musciformis* et *Hypnea Cervicornis*

et on trouve moins fréquemment : *Codium* s.p., *Sargassum* s.p. et *Cymodocea nodosa* (une phanérogamme).

Les trois espèces d'algues *Ulva*, *Hypnea* et *Cladophora* constituent plus de 80 % des dépôts sur toute la côte.

Les données quantitatives sont très difficiles à estimer du fait de la quantité d'algues flottantes, d'algues enterrées et de la difficulté de séparer les algues fraîches de celles déjà décomposées et de connaître leur taux de renouvellement en mer.

De plus, on remarque des variations annuelles importantes, dues aux conditions climatiques.

Cependant, des sorties mensuelles effectuées par le CRODT (I. GNING, 1985) ont permis d'évaluer les quantités et de localiser ces algues.

On note deux pôles principaux où les algues sont présentes : d'abord à proximité de Dakar, en baie de Hann et jusqu'à Rufisque, on trouve essentiellement *Ulva* et *Cladophora* dont on estime la quantité à 100 à 500 tonnes de matière sèche par an.

Le deuxième pôle se situe entre Mbodiène et Joal, où l'on trouve de grosses quantités d'un mélange : 40 % *Cladophora*, 50 % *Hypnea* et 10 % de *Cymodocea* et localement un peu d'*Ulva*. On en estime la quantité à 300 à 500 tonnes de matières sèches sur 30 km de côte. Le dépôt peut atteindre par endroits 200 kg de matière fraîche par mètre linéaire de plage.

Entre ces deux pôles, on trouve localement un autre mélange : *Hypnea* 50 %, *Cladophora* 30 %, *Ulva* 20 % surtout entre Mbour et Mbodiène, mais en quantités moindres. Sur l'ensemble de la Petite Côte, la production annuelle est estimée à environ 10 000 tonnes d'algues sèches (MOLITION 1975).

2 . M A T E R I E L S E T M E T H O D E S D ' A N A L Y S E S

2.t. FERMENTEURS DE LABORATOIRE EN DISCONTINU

Les réacteurs utilisés pour la fermentation en discontinu sont des modèles de laboratoire de 2,5 litres, maintenus à 35 - 37°C dans un bain marie chauffé et brassé par un bloc thermoplongeur thermostaté (fig. 1).

Le niveau est maintenu constant grâce à une réserve d'eau déminéralisée reliée au bac par un tube de verre. L'évaporation est limitée par une feuille de plastique recouvrant le bain.

Les fermenteurs sont agités manuellement en les secouant une à deux fois par jour. Cette agitation sommaire et le fait que les algues ne sont pas broyées expliquent que nous avons dû réaliser nos essais à de faibles concentrations en matière sèche.

La production journalière de gaz est mesurée dans des éprouvettes graduées plongées dans une solution acide de sulfate de potassium, pour éviter la solubilisation du gaz carbonique ($H_2SO_4 = 30 \text{ ml/l}$, K_2SO_4 , Helianthine) .

L'évolution du pH est suivie tout au cours de la fermentation.

2.2. FERMENTEUR DE LABORATOIRE EN CONTINU

L'essai de fermentation en continu a été réalisé en réacteur de 0,75 l (fig. 2) ; le substrat est constitué d'algues séchées, broyées, remises en solution dans l'eau de mer. Le dispositif de chauffage est le même que celui décrit pour la fermentation discontinue.

Le fermenteur est agité et alimenté chaque jour. Une pompe péristaltique aspire le volume d'algues fermentées et par simple dépression un volume identique d'algues fraîches est admis dans le réacteur. Au cours de l'alimentation la sortie de gaz est fermée par une pince de Mohr. L'alimentation se fait en anaérobiose, tous les tuyaux étant remplis de substrat. Le prélèvement se fait dans une éprouvette graduée permettant ainsi une mesure précise du volume d'algues fraîches introduit dans le réacteur.

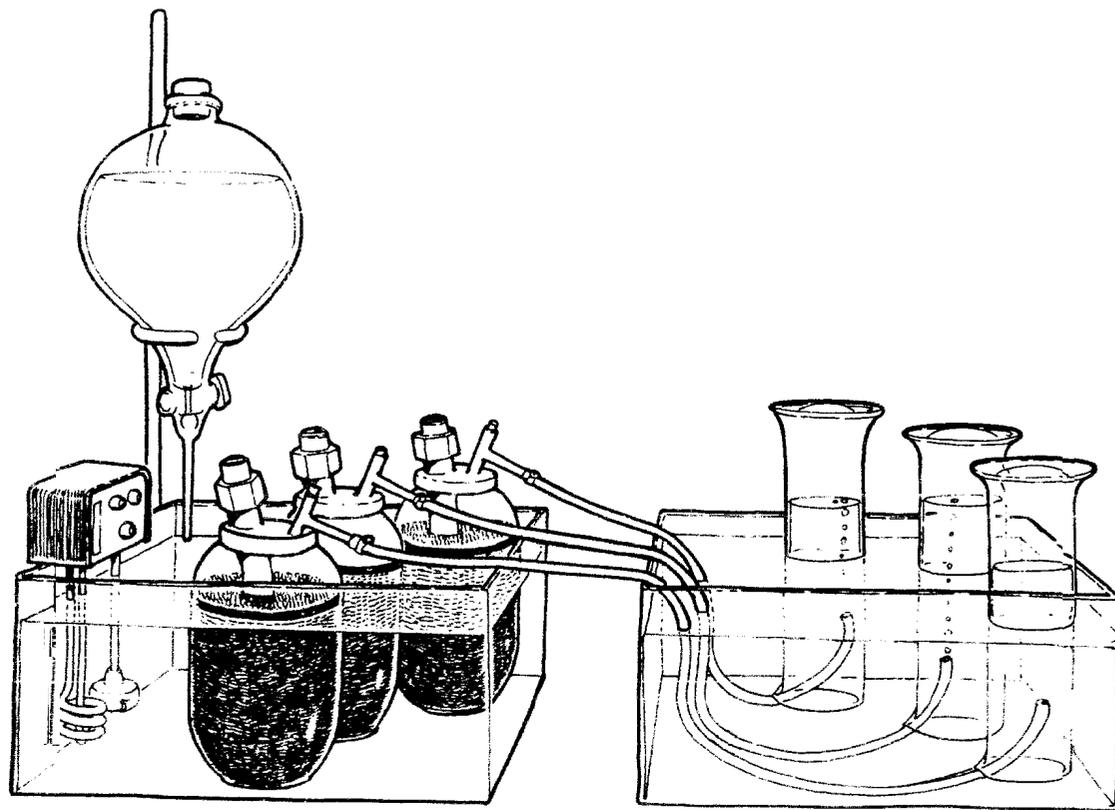
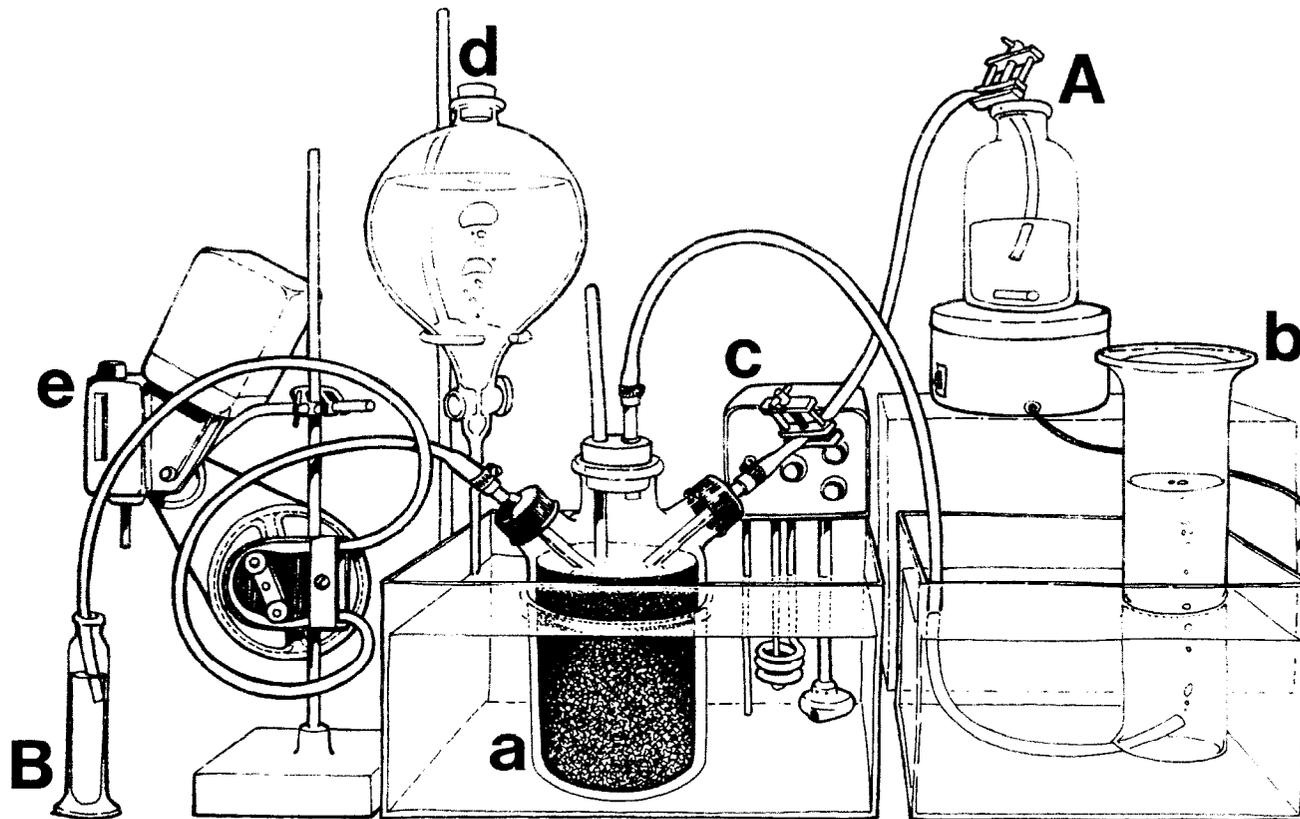


Figure 1 - Fermenteurs discontinus de 2,5 l



- A - Alimentation du fermenteur : algues sèches broyées en solution
- B - Sortie du fermenteur : algues fermentées
- a - fermenteur 750 ml
- b - gazomètre 1000 ml
- c - Bain-marie Polystat
- d - Réserve d'eau distillée pour le maintien de niveau
- e - Pompe péristaltique

Figure 2- FERMENTEUR CONTINU DE 0,75 l

2.3. ANALYSES DE GAZ

La composition du Biogaz (pourcentages en méthane, gaz carbonique et air) est mesurée par chromatographie en phase gazeuse (CPG) dans les conditions suivantes :

- . Chromatographe Beckman GC 2120 à catharomètre
- . Colonne en acier inox de 3 mm x 1,5 m rempli de charbon actif
- . gaz vecteur : Hélium
- . Pression du gaz vecteur dans la colonne : 2 bras
- . Température du four : 50°C
- . Température de l'injecteur : 60°C
- . Température du détecteur : 100°C
- . Catharomètre réglé à 150 mA.

Le pic composite d'air ($O_2 + N_2$) sort à 2 mn, le méthane à 6 mn et le gaz carbonique à 20 mn (fig. 3). Le volume de gaz injecté est de 1 ml.

L'établissement des courbes d'étalonnage se fait en fonction de la hauteur des pics d'air et de gaz carbonique et de la surface du pic de méthane

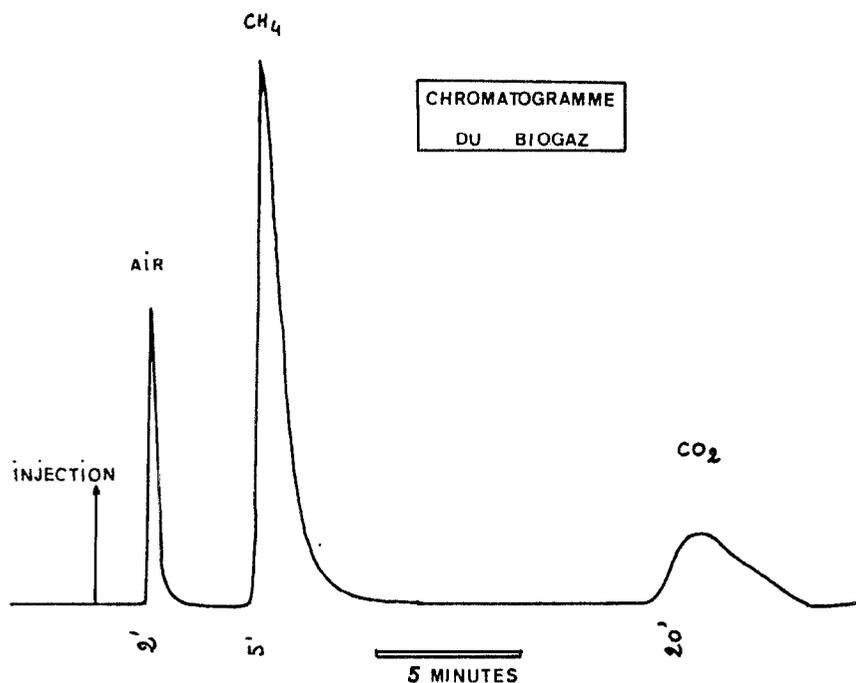


Figure 3.- Chromatogramme du biogaz.

2.4. ANALYSES DES ACIDES GRAS VOLATILS

Les AGV contenus dans les fer-menteurs sont dosés par chromatographie en phase gazeuse. La séparation chromatographique est réalisée à l'aide d'un chromatographe DELSI 300 FF 1 EV muni d'un détecteur à ionisation de flamme.

- . Colonne en acier inox 3 m x 0,5 mm remplie de Porapak S 80 - 100 mesh.
- . Gaz vecteur : Azote
- . Pression du gaz vecteur 2,3 bars
- . Température du four 170°C
- . Température de l'injecteur 250°C
- . Température du détecteur 250°C
- . Débits d'air et d'hydrogène 300 ml/mn et 30 ml/mn.

Les AGV sont directement introduits dans le chromatographe sans traitement préalable. Nous avons choisi pour calculer la concentration en AGV,

l'acide butyrique comme standard et le rapport $\frac{\text{Surface Acide Butyrique}}{\text{Surface Acide Butyrique témoin 1ml}}$ permet d'effectuer le dosage.

Les analyses de biogaz et des acides gras volatils en chromatographie en phase gazeuse ont été réalisées à l'antenne de microbiologie ORSTOM de l'ENSUT.

2.5. AUTRES ANALYSES

A l'analyse des différents éléments N, P, K Na etc... entrant dans la composition des algues et du compost a été réalisée par le laboratoire de l'ORSTOM HANN de chimie des moyens analytiques.

Nous avons également effectué les analyses suivantes à l'antenne de microbiologie ORSTOM de l'ENSUT :

- . MS = Matières sèches : résidus sec à 105°C
- . MM = Matières minérales : résidus sec à 500°C.

(Les MSV matières sèches volatiles sont obtenues en faisant la différence entre les MS et les MM).

. TAC = Titre alcalimétrique complet. Dosage titrimétrique au pH mètre avec de l'acide sulfurique (Normes Françaises - juillet 1977).

. DCO = demande chimique en oxygène. Oxydation des matières organiques en milieu acide et à chaud, puis dosage de l'excès d'oxydant (bichromate de potassium) par du sulfate de fer et d'ammonium (sel de Mohr) en présence d'un indicateur d'oxydation (Ferroïne).

(Normes Françaises - septembre 1971) ,

Enfin les mesures de pH et de NH_4^+ (ammoniac) sur le surnageant fermenté ont été réalisées au CRODT.

3 . R E S U L T A T S E T D I S C U S S I O N S

3.1. COMPOSITION DES ALGUES

La composition élémentaire des algues révèle une forte teneur en matières minérales (30 à 40 % des MS), et notamment en calcium (BROUARD, 1983). Le calcium peut précipiter en carbonate de calcium augmentant ainsi le pouvoir tampon du milieu vis-à-vis des acides gras volatils formés au cours de la fermentation des algues.

, % de la matière solide (MS)	Algues de Joal	Cladophora
Solides volatils MSV	65 %	60 %
Cendres (Matières minérales MM)	35 %	40%

Ainsi dans la suite de l'étude nous exprimerons les résultats en fonction des MSV (matières organiques) et non des MS (matières organiques + matières minérales), la matière organique étant seule fermentescible.

La présence de soufre en quantité importante dans les matières sèches (suivant les variétés d'algues, de 2 à 3,5 %) se traduit par la présence d'hydrogène sulfuré au cours des essais (BROUARD, 1983) repérable à l'odeur. La concentration en soufre de l'eau de mer étant 0,9 g/l, les algues séchées renferment déjà 0,9 % de soufre provenant de l'eau de mer.

Avec un titre alcalimétrique complet TAC = 6 000 mg/l, les algues en solution dans l'eau de mer constituent un bon milieu tampon pour les acides volatils (AGV).

L'analyse des éléments minéraux montre une forte teneur en azote et en phosphates, une teneur en carbone relativement faible. Ceci est une condition favorable à la fermentation méthanique.

Tableau 1.- Composition du mélange *Ulva*, *Hypnea*, *Cladophora* à dominante *Hypnea* en % de poids sec

C	N	P	K	Na	Ca	Mg
21,4	2,45	0,18	1,9	3,6	2	1,2

Cette analyse permet de calculer un rapport C/N de 9/1 et un rapport C/N/P de 120/13,5/1.

En comparant ces résultats avec ceux obtenus avec le fumier de Bovin (LECKERQ, PETITCLERC, 1985) on peut noter que la composition minérale des algues marines est favorable au développement des microorganismes anaérobies.

Tableau 2.- Comparaison entre la composition moyenne des algues et le contenu de panses de bovins d'abattoirs en % poids

Sustrat éléments	C	N	P	K	C/N
Algues	21,4	2,45	0,18	1,9	8,8/1
Contenus de Panses	44,7	1,16	0,52	0,29	38,6/1

Tableau 3.- Composition en % de poids sec d'algues pures et mélangées

Substrat éléments	N	P	K
Mélange d'algues	2,45	0,18	1,9
Hynea*	2,9	0,27	0,9
Cladophora*	2,5	0,27	4,4
Ulva*	1,4	0,14	1,3

De même, ces résultats sont comparables avec ceux obtenus sur des algues pures (*I. GNING ; 1985).

La composition moyenne des algues marines tant en éléments minéraux majeurs (C,N,P,K) qu'en oligoéléments nous laisse présumer que ce substrat présente des conditions favorables à une fermentation méthanique par les germes anaérobies.

3.2. SELECTION DE L'INOCULUM

La sélection de l'inoculum a été réalisée en ensemant le mélange d'algues de Joal avec différents inoculum dans quatre réacteurs.

a) Boues de vasière prélevées à 200 m à l'intérieur des terres à la pointe SANTI (boués à forte odeur sulfureuse).

• Fermenteur en eau de mer.

b) Algues préfermentées prélevées sous une épaisse couche à la pointe SANTI sur la plage. Fermenteur en eau de mer.

c) Boues de Mangrove prélevées à 2 km de Joal sur la route de Djifère (Boues grisâtres, fortement sablonneuses, à faible odeur de vase). Fermenteur en eau de mer.

(le choix de cet inoculum a été suggéré par V. JACQ à la suite de ses travaux de microbiologie sur les rizières de mangrove).

d) Boues anaérobies résultant de la fermentation de fumier de bovins - fermenteur en eau douce. Ces boues ont été prélevées au 40^e jours de fermentation discontinue du fumier et ont été maintenues en température.

Les résultats de ces essais nous ont montré que seul le réacteur inoculé avec des boues de mangrove donnait des résultats satisfaisants : 12,71 de biogaz dont 7,5 l de méthane. Nous n'avons pas observé de fermentation dans les réacteurs 1 et 4 ; le réacteur 2 n'ayant produit que 3 l de biogaz après une phase de latence de 15 jours.

Les boues de mangroves ont donc été choisies comme inoculum au cours de l'étude de la méthanisation des algues marines.

3.3. FERMENTATION DISCONTINUE DES ALGUES MARINES

Nous avonsensemencé quatre fermenteurs avec différentes variétés d'algues, de l'eau de mer et l'inoculum ainsi présélectionné (cf. tableau 4).

Tableau 4.- Composition des essais de fermentation discontinue.

Fermenteur	Especed'Algues	Poids sec	Inoculum	eau de mer
1	Mélange Joal	100 g	200 g	1,7 l
2	Mélange Joal Algues préfermentées	100 g	200 g	1,7 l
3	Cladophora	50 g	200 g	1,7 l
4	Ulva lactuca	100 g	200 g	1,7 l

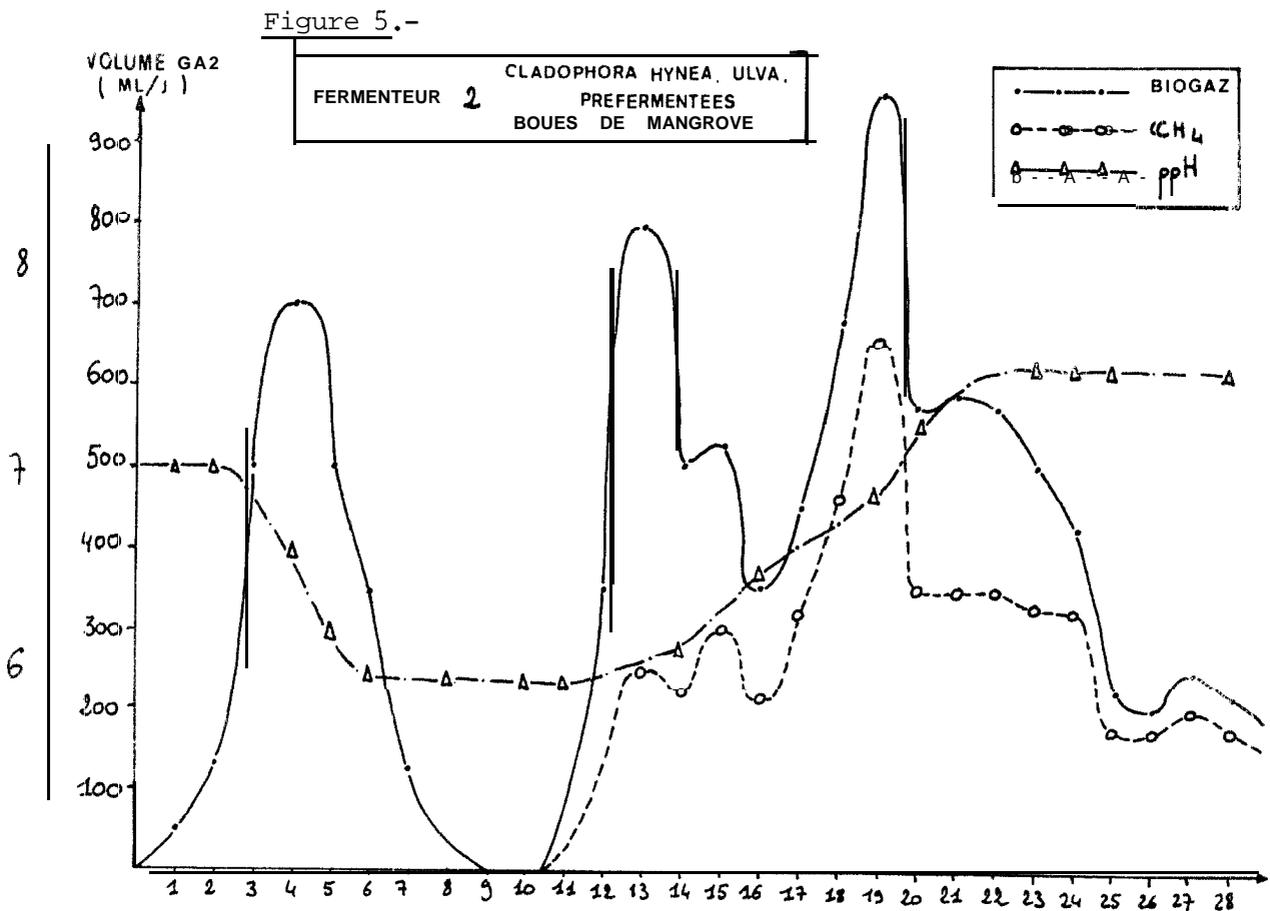
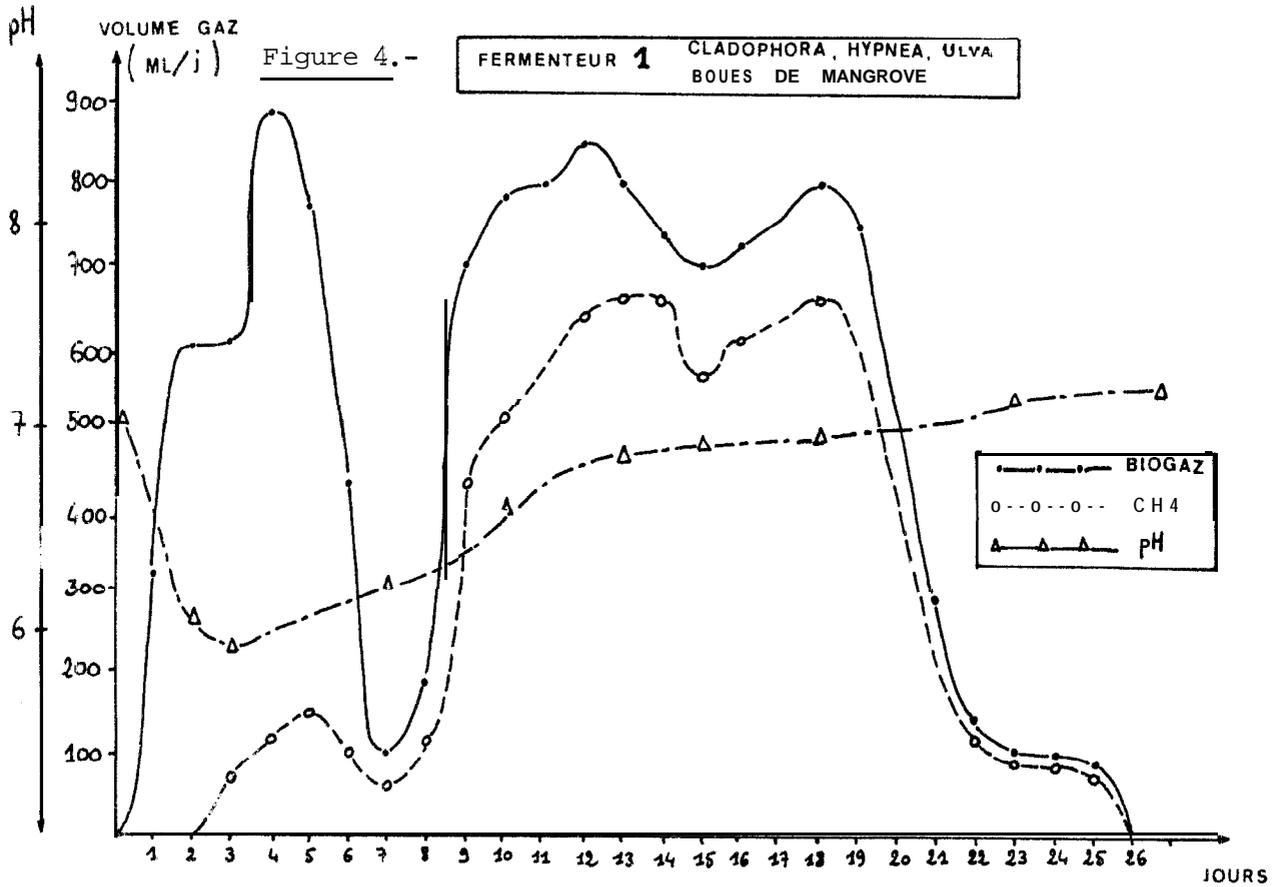
Le mélange d'algues de Joal est constitué de $\approx 50\%$ de la variété *Sypnea*, $\approx 40\%$ de *Cladophora* et de $\approx 10\%$ d'*Ulva lactuca* et de traces de *Symodocea nodosa*. La préfermentation a consisté à laisser les algues en tas à l'humidité de la rosée pendant un mois.

Les fermenteurs 1, 2, 3 ont produit dans les conditions d'anaérobiose un biogaz à forte teneur en méthane proportionnelle à la charge en algues (fig. 4,5), tandis que le réacteur 4 (*Ulva lactuca*) ne donne pas de résultats satisfaisants : le volume de biogaz produit reste très faible.

Les courbes reportent les productions journalières de biogaz et de méthane et l'évolution du pH dans les fermenteurs 1 et 2.

Le réacteur 3 ayant reçu une charge organique plus faible (50 g d'algues dans 2 l) les résultats ne sont portés que sur la courbe des rendements massiques, le rendement volumique étant faible.

Ces courbes de fermentations montrent que la biodégradation des algues peut être dissociée en deux phases :



• Une phase d'hydrolyse de la matière organique avec acidification du milieu. Sa durée est de 7 à 10 jours et est caractérisée par une évolution du pH vers les valeurs acides (7 à 5,9/5, 8) et une production de CO₂ essentiellement (24 à 37 l/kg de MS).

• Une phase de méthanisation active (du 8^{ème}/10^{ème} jour au 25^{ème}/30^{ème} jour) au cours de laquelle la flore méthanogène transforme les AGV formés antérieurement en méthane et gaz carbonique.

On peut observer alors une remontée du pH jusqu'à 7 et 7,5 et la production d'un biogaz à 80 à 90 % de CH₄ (80 à 100 l/kg de MS).

Alors que pour d'autres substrats les phases d'acidogénèse et de méthanogénèse sont simultanées, la fermentation des algues marines en anaérobiose présente 2 phases bien distinctes : 1 phase acidogène et une phase méthanogène. L'existence de ces deux phases successives peut s'expliquer par le fait que les méthanogènes du milieu marin résistent à des pH bas (5,9/6) et à des concentrations élevées en AGV, mais ne deviennent actives qu'après une phase de latence d'une semaine.

La fermentation anaérobie des algues dure 22 jours, la production de biogaz décroissant rapidement. Le temps de latence étant long (7 à 10 jours) la production optimum de CH₄ se trouve réduite aux derniers 16 jours. Le biogaz produit contient alors 80 % de méthane et des traces importantes d'hydrogène sulfure. Dans le milieu fermentaire on note la présence des acides gras volatils (acide butyrique) et de composés soufrés non identifiés, tous à forte odeur, caractéristique.

Les résultats des essais des fermenteurs 1, 2 et 3 à 20 et 25 jours sont résumés dans le tableau 5.

Tableau 5.- Résultats de fermentation discontinue des algues

TEMPS DE SEJOUR	20 JOURS				25 JOURS			
	Essais	MS	biogaz	CH ₄	CH ₄ /j	biogaz	CH ₄	CH ₄ /j
Résultats	(g)	(l.)	(l)	(l/j.)	(l.)	(l.)	(l/j.)	moyen
ESSAI 1 (algues Joal)	100	12,75	7,65	0,38	13,46	8,1	0,32	58
ESSAI 2 (algues Joal préf)	100	7,7	3,0	0,15	10,0	4,8	0,185	48
ESSAI 3 (Cladophora)	50	3,25	2,8	0,14	3,9	3,3	0,135	82

La faible charge volumique, l'agitation insuffisante l'absence de broyage et la spécificité de ce substrat fermentant en 2 phases successives augmentant ainsi le temps de rétention peuvent expliquer les rendements volumiques en biogaz relativement faibles.

Figure 6. _

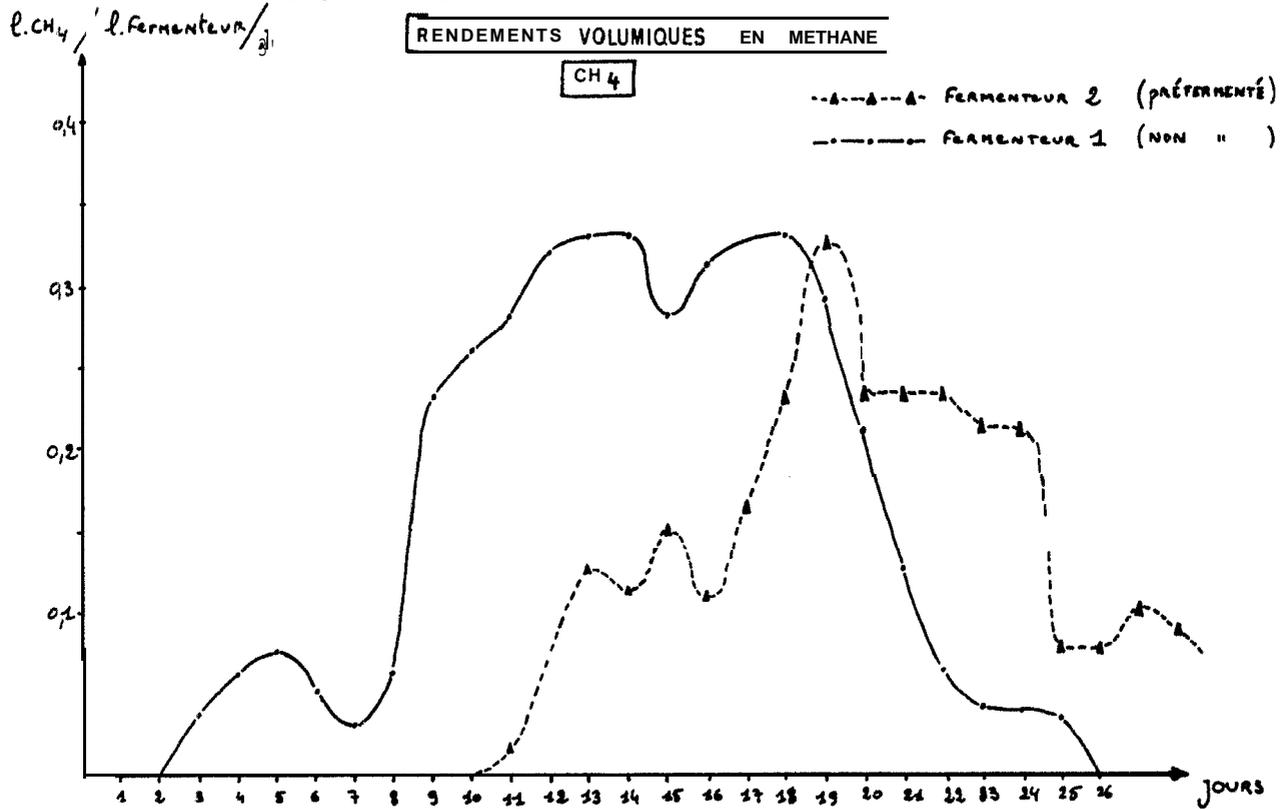
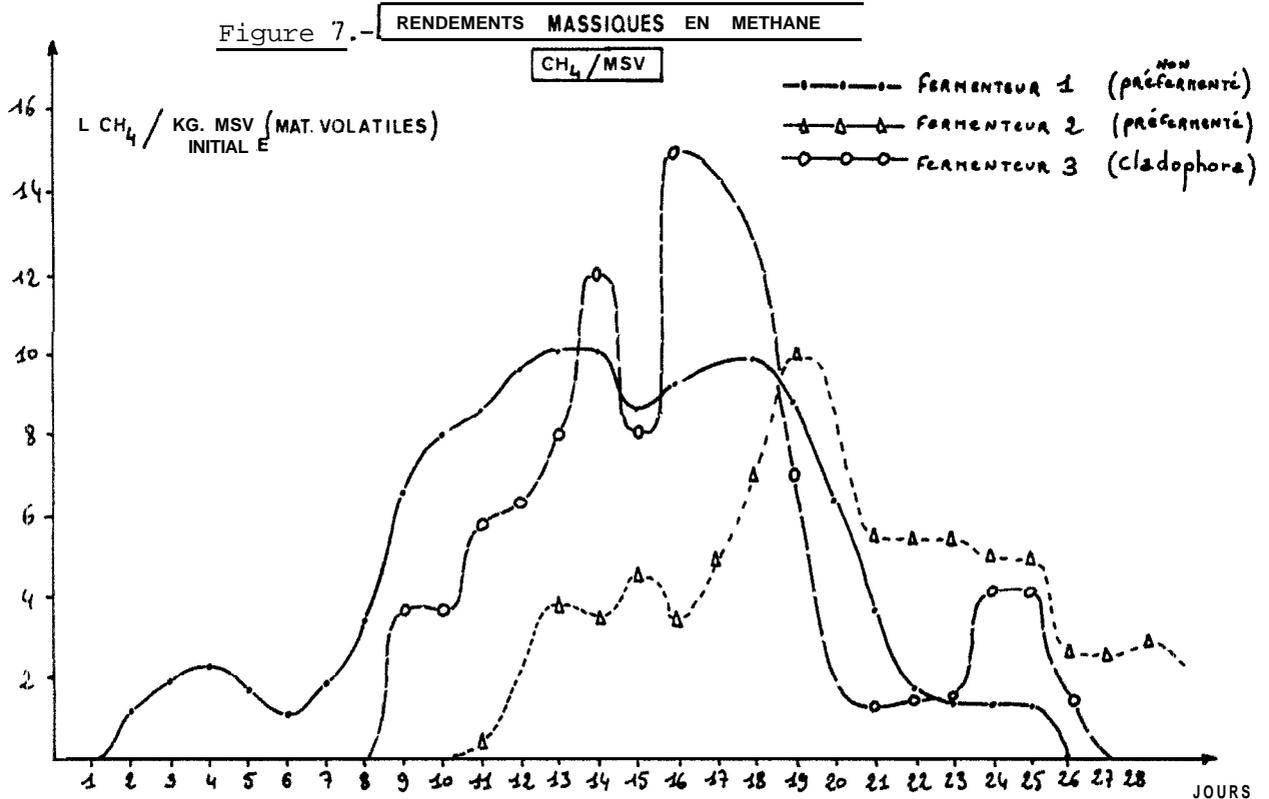


Figure 7. -



La courbe des rendements volumiques (fig. 6) montre qu'entre le 9^{ème} et le 20^{ème} jour la production de CH₄ est de 7,2 l soit 0,6 l par jour (12 l de biogaz).

La phase méthanogène est caractérisée par un rendement volumique de 0,24 l de CH₄/l de fermenteur/jour.

Le tableau 6 résume les rendements massiques (fig.7) des différents fermenteurs en fonction de la charge en matière organique exprimée en poids de matières sèches volatiles (MSV).

Tableau 6.- Essais discontinus - Rendements massiques en biogaz et CH₄

Résultats Essais	TS (j.)	MS (g.)	MSV (g.)	CH ₄ (l.)	CH ₄ /MSV (l/kg.)	BIOGAZ/MSV (l/kg.)
ESSAI 1 (Algues Joal)	25	100	65	8,1	125	205
ESSAI 2 (Algues Joal préf)	25	100	65	4,8	75	155
ESSAI 3 (Cladophora)	25	50	30	3,35	110	130

Avec un rendement en biogaz de 205 l/kg MSV (soit 125 l CH₄/kg MSV) le fermenteur 1 donne des résultats comparables à ceux obtenus avec d'autres substrats d'origine agricole. Le fermenteur 3 avec 100 l CH₄/kg MSV se rapproche également de ce résultat. Déjà à ce stade de l'étude, la fermentation discontinue des algues marines, en eau de mer, inoculées avec de la boue de mangrove donne des rendements massiques de transformation énergétique de la matière organique comparables avec les données obtenues sur substrats pailleux ou sur des algues fermentées dans d'autres laboratoire (tableau 7).

Tableau 7.- Comparaison des rendements massiques de fermentation de divers algues

ESPECE	l CH ₄ /KG MSV	*TS. (j.)	REFERENCE
ESSAI 1 (Cladophora, Hypnéa)	125	25	-
ESSAI 2 (Cladophora)	110	25	-
Hydrodyction + Cladophora	250	20	BINOT <u>et al.</u> , 1981
Laminaria saccharina	120	25	TROJANO <u>et al.</u> , 1976
Lemna	130	26	WISE <u>et al.</u> , 1981
Ulva ca lactuca	150/190	20	WISE <u>et al.</u> , 1979 BROUARD, 1983

* temps de séjour.

	l CH ₄ /KG MSV	TS. (j.)
Contenu de panses de bovins	120	25

Cependant, La fermentation en discontinu ne permet pas d'utiliser l'inoculum de façon optimale, et a "L'inconvénient majeur de se produire en deux phases, avec un temps de latence de 10 jours avant la phase méthanogène.

11. en résulte que même avec de bons rendements massiques, le rendement et La charge volumique restent beaucoup trop faibles.

Pour résoudre ce problème, et permettre d'augmenter la charge et le rendement volumique de fermentation (c'est-à-dire pour diminuer le temps de séjour et par conséquent la taille des cuves), tout en conservant le même rendement massique, nous avons testé une fermentation en continu.

3.4. FERMENTATION DES ALGUES EN CONTINU

La fermentation des algues en continu a été suivie pendant 145 jours, au cours desquels nous avons progressivement augmenté la charge en MSV (voir fig. 8 et 9 et tab. 8).

Ceci nous permet de diviser le processus d'acclimatation en 4 phases (comme indiqué sur la courbe d'alimentation). Nous avons alimenté le fermenteur avec une solution à 10 % de MS, teneur équivalente à celle des algues fraîches.

- ALGUES MARINES -

Tableau 8. Résultats de fonctionnement du fermenteur en continu sur
145 jours

	Période (jours)	Alimentation (gMSV)	Production de gaz (ml)	Analyses de gaz	
				CH ₄ %	CO ₂ %
I	1 - 5	BATCH 1 : 30 g	160		
	5 - 10	2	1 150	49	51
	10 - 15	4	1 800	47	52
	15 - 20	4	850	85	25
	20 - 25	4	780	85	25
II	25 - 30	7,4	870	72	28
	30 - 35	7,5	1 020	75	25
	35 - 40	7,5	1 020	85	15
	40 - 45	7,5	1 090		
	45 - 50	7,5	950		
III	50 - 55	10	1 250		
	55 - 60	10	1 250		
	60 - 65	10	1 350	74	26
	65 - 70	10	1 300	70	30
	70 - 75	10	1 270	75	25
	75 - 80	10	1 370		
	80 - 80	10	1 300		
IV	85 - 90	12,5	1 500	65	35
	90 - 95	12,5	1 780		
	95 - 100	12,5	1 810	75	25
	100 - 105	12,5	1 650		
	105 - 110	12,5	1 650		
V	110 - 115	15	2 000		
	115 - 120	15	2 300	71	29
	120 - 125	15	2 600		
	125 - 130	15	2 450	73	27
	130 - 135	15	2 550		
	135 - 140	15	2 500	72	28
	140 - 145	BATCH 2 : 21 g	3 520	L	

Phase I : durée 25 jours

Cette phase correspond à un fonctionnement du réacteur en discontinu avec une alimentation en MSV de 0 à 1 g. La production moyenne de biogaz est de 180 ml/j.

Phase II : durée 25 jours

Au bout de 25 jours nous avons commencé l'alimentation en continu du fermenteur à raison de 2,6 g de MS/j ce qui correspond à 1,5 g de MSV/j ; le rendement volumique s'élève à 205 ml de biogaz/jour.

Phase III : durée 35 jours

Cette phase dénommée phase d'acclimatation correspond à une alimentation de 3,3 g de MS/j soit 2 g de MSV/j est caractérisée par une production de biogaz moyenne de 265 ml/jour avec une composition du biogaz variant entre 70 et 75 % de CH₄ et de CO₂ de 25 à 30 %.

Phase IV : durée 25 jours

Au bout de 85 jours nous avons amorcé la montée en charge. L'alimentation est faite une fois tous les 2 jours à raison de 4,1 g de MS/j (2,5 g de MSV/j). Le rendement volumique en biogaz s'élève alors jusqu'à 345 ml/j.

Phase V : durée 30 jours

Cette phase V ou phase stabilisée correspond à un fonctionnement "optimum" du fermenteur. Pendant les 20 derniers jours nous l'avons alimenté avec 5 g de MS/j (3 g MSV/j.). Le rendement volumique étant de 505 ml de biogaz/j.

Phase VI : durée 5 jours

Afin de vérifier que le rendement du réacteur était optimum nous avons réalisé un "Batch" final en alimentant le fermenteur avec 35 g de MS en une fois soit 21 g de MSV. Le rendement volumique est dans ce cas maximum à 740 ml/j pour une fermentation complète obtenue en 5 jours.

Ce résultat montre que nous n'avions pas atteint le rendement optimum en fin de phase V.

L'ensemble des résultats des phases I à III montre que le rendement volumique du réacteur est en relation directe avec la charge organique. L'acclimatation progressive des microorganismes peut exiger jusqu'à 50 jours et les résultats satisfaisants du fonctionnement d'un tel fermenteur ne sont obtenus qu'après 120 jours de montée en charge.

Les rendements massiques et volumiques de ces phases sont représentés sur le tableau 9.

Figure 8.-

Fermenteur Continu
Production de biogaz

Production
biogaz
ml/5 jours

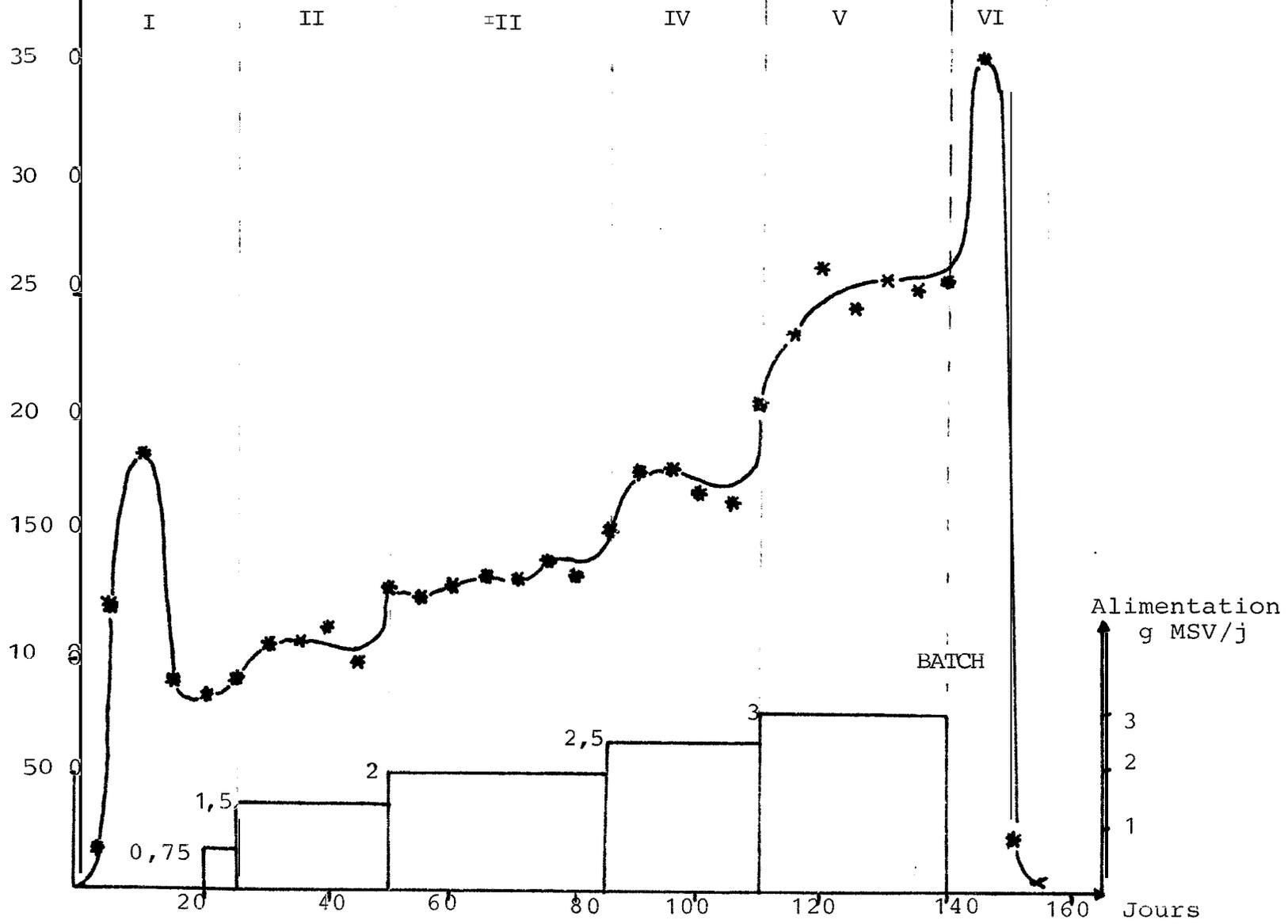


Tableau 9. - Résultats de la fermentation en continu au cours des 6 phases

	RENDEMENT VOLUMIQUE ml/j	RENDEMENT MASSIQUE l BIOGAZ/KG MSV	l CH ₄ /KG MSV
I	180		
II	205	131,5	100
III	265	133	100
IV	345	140	105
V	505	168	125
VI	704	175	

Le rendement volumique du fermenteur croît avec la charge en matière organique, il en est de même pour le rendement massique.

En fonctionnement stabilisé (phase V), le biogaz produit contient 70 à 75 % de CH₄. On décèle toujours une forte odeur d'hydrogène sulfuré.

Au cours de la phase stabilisée Les différentes analyses effectuées sur le surnageant ont donné les résultats suivants : le pH se stabilise à 7,4, Le TAC (titre alcalimétrique complet) est de 6 500 mg/l. Le dosage de l'acide butyrique par chromatographie en phase gazeuse a permis de déceler une concentration moyenne de 400 à 440 mg/l cependant que NH₄⁺ est présent dans le milieu à la concentration de 120 mg/l.

Le DCO résiduelle dans le surnageant relativement faible (3 000 mg/l) témoigne d'une bonne dégradation du substrat.

Dans ces conditions de fonctionnement stabilisé, les résultats finaux de La fermentation méthanique en continu des algues marines sont consignés dans le tableau 10.

Figure 9.

Biogaz (l)
cumulé

Fermenteur continu
Production de biogaz cumulée

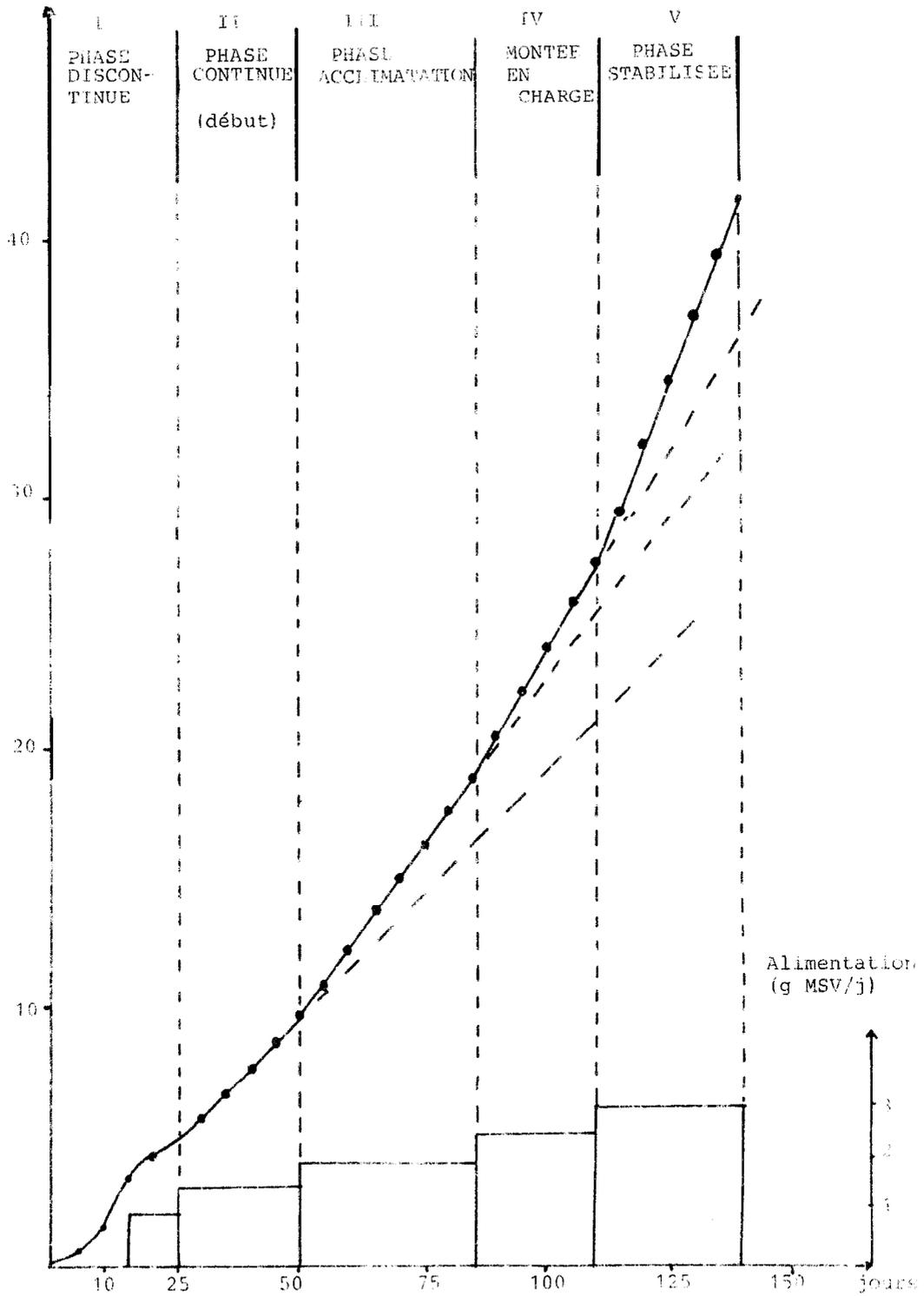


Tableau 10.- Résultats de fermentation continue des algues - Phase V

Charge volumique	67 ml/l ferm./j
Charge massique	4 g MSV/l ferm./j
Temps de séjour	15 jours
Production de biogaz	505 ml/j
Rendement volumique en biogaz	0,67 vol/vol ferm./j
Rendement massique en biogaz	168 l/kg MSV *
% CH ₄	70 à 75 %
Rendement massique en CH ₄	125 l/kg MSV

*1 m³ de biogaz à 75 % de CH₄ équivaut à 0,9 l d'essence ou 6 kWh électrique.

Ainsi, en conservant le même rendement massique en méthane que lors de l'essai discontinu (125 l CH₄/kg MSV), la fermentation en continu permet de multiplier par 3 le rendement volumique par rapport à la seule phase méthanogène en discontinu (0,67 vol/vol contre 0,24 pour les 12 derniers jours).

On peut diminuer par 4 le temps de séjour et multiplier par 4 la charge en algues (4 g MSV/l cuve/j contre 1,05). Le coût du m³ de cuve de fermentation sera amorti 4 fois plus vite en continu.

La phase finale (fig. 10) (en batch : phase VI) nous montre que l'on pourrait encore améliorer ce résultat. Lors du batch, le temps de séjour descend à 10 jours, le rendement volumique en biogaz passe à 1 vol. de biogaz/vol. de cuve/j en **conservant** le rendement massique précédent de 125 l CH₄/KG MSV. Ceci confirme les résultats de transformation énergétique de la matière organique trouvés en discontinu et montre l'intérêt majeur de fermenter les algues marines en continu.

3.4. ANALYSE DU COMPOST

Les boues résultant de la fermentation en anaérobiose des algues marines contiennent 15 % de matières sèches et présentent une bonne décantabilité (voir fig. 31). La vitesse de décantation est de 2,5 mm/mn. On peut ainsi séparer facilement le compost d'algues de la phase liquide

Figure 10.- Fermentation d'algues PHASES V et VI

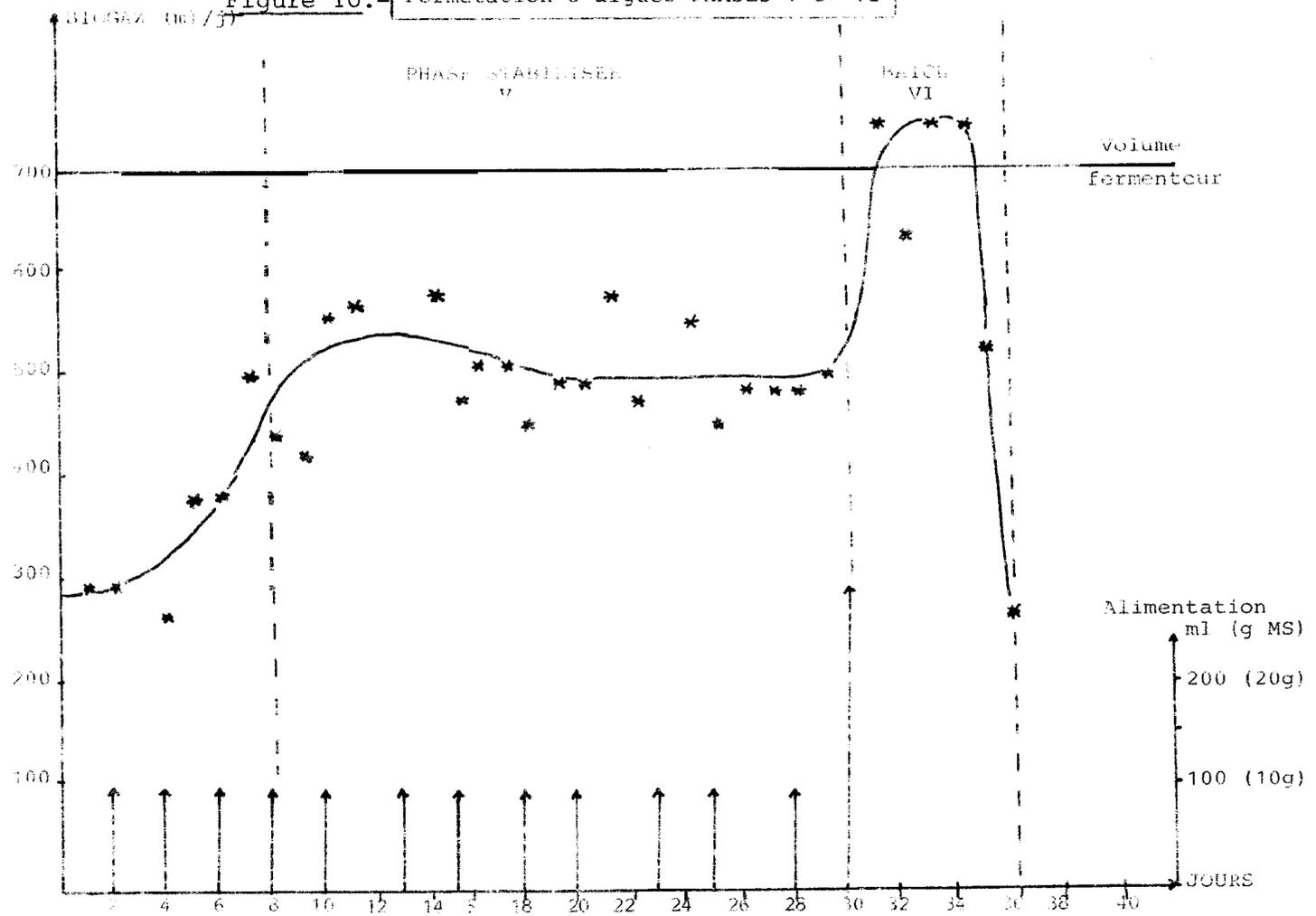


Figure 11.- DECANTATION DES BOUES FERMENTEES

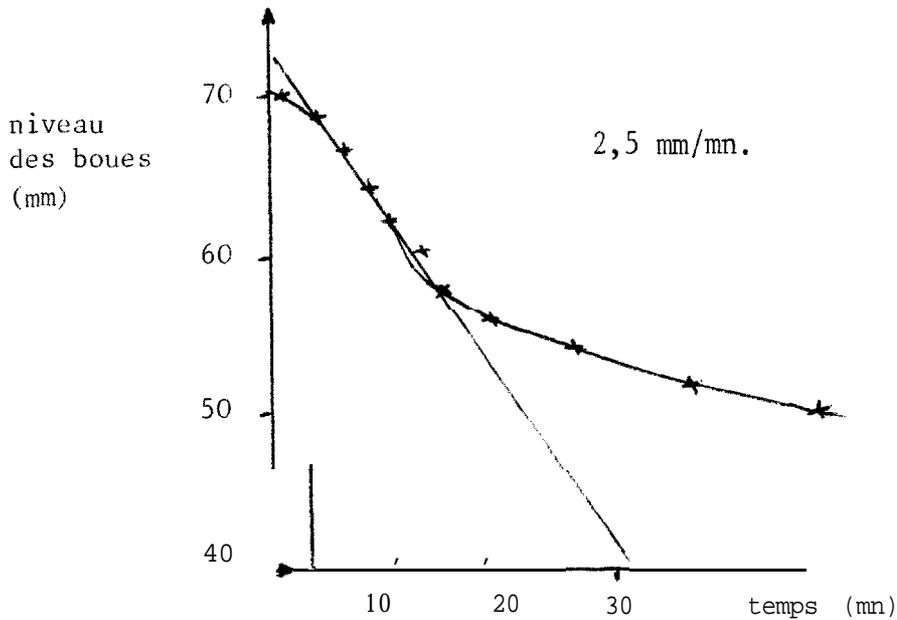


Tableau 11.- Analyse du compost % de poids sec

	C	N	P	K	Na	Ca	Mg	C/N
Algues	1717,5	1,7	0,18	1,15	6,5	2,7	1,1	10/1
Panses de bovins	50		0,43	0,70	1,08			
	50,5	1,09				0,55	0,16	46/1

Le compost d'algues avec un C/N de 10/1 a une valeur agronomique supérieure au compost obtenu par fermentation méthanique des contenus de panses de bovins (PETITCLERC, LECLERC, 1985).

La teneur en sel (6,5 % de Na) peut constituer un frein à l'utilisation de ce compost. Cependant des essais effectués sur un compost d'algues marines préparé en aérobiose (I. GNING, 1985) ont montré que son utilisation était possible sur les sols sablonneux des Niayes du Cap-Vert.

Dans ce cas, le sel est lessivé lors de l'arrosage des plantes maraîchères, mais la matière organique reste, et valorise fortement ces sols qui en ont besoin. D'autre part, les composés organiques sont transformés, par fermentation méthanique, sous des formes généralement directement assimilables par les plantes (notamment, l'azote se retrouve principalement dans une forme ammoniacale qui se minéralise rapidement en nitrate).

Le compost obtenu par fermentation méthanique, moins salé que le compost précité serait d'usage plus facile. Malgré cela, une étude de projection dans le temps de la salinisation de la nappe phréatique s'avère indispensable.

CONCLUSIONS

Les essais de fermentation méthanique des algues marines échouées sur la côte du Sénégal ont montré la faisabilité de cette technologie pour valoriser un tel substrat, généralement inutilisé, pour produire du gaz combustible et du compost à usage agronomique.

L'utilisation de boues de mangrove comme inoculum et l'adaptation de cette microflore fermentaire anaérobie au milieu marin salé constitue la grande originalité de ce projet. Leur réussite semble constituer une découverte originale.

Les premiers essais en discontinu ont montré que la fermentation des algues se fait en deux phases bien distinctes :

- a) Une acidification des algues durant 10 jours, puis,
- b) après adaptation des bactéries méthanogènes originaires du biotope mangrove (qui résistent à un pH intermédiaire de 5,9), la transformation des composés intermédiaires en méthane et gaz carbonique, en 15 jours, avec des rendements massiques équivalents à ceux obtenus sur substrats pailleux.

Durant l'essai en continu de 145 jours, la charge massique a été progressivement montée à 6 kg MS/m³ cuve/j et le temps de séjour limité à 15 jours en travaillant sur une solution à 10 % MS soit une teneur équivalente à celle des algues fraîches.

Les bons rendements massiques de la transformation énergétique ont été confirmés (125 l CH₄/kg MSV) et on a obtenu un rendement volumique compatible avec les impératifs économiques d'un projet de fermentation méthanique (0,7 à 1 vol. gaz/volume/j avec 75 % de méthane).

Le compost ainsi fabriqué a une composition élémentaire favorable, et constitue un bon amendement organique. Sa teneur en sel (NaCl) rend nécessaire de prévoir des essais agronomiques de longue durée. Cependant, des essais menés au CRODT sur des composts aérobies d'algues marines ont déjà montré qu'il est possible d'utiliser ces compost salés sur les sols sablonneux des Niayes du Cap-Vert.

Les résultats de laboratoire nous ont incités à construire et faire fonctionner un fermenteur pilote de 150 litres. Les résultats mesurés après 1 mois 1/2 de fonctionnement confirment déjà ceux des essais de laboratoire. Ainsi, on peut se permettre d'envisager un projet de plus grosses d'unités de fermentation en continu. A titre d'exemple si on extrapole les résultats à une cuve de 1 m³, on peut s'attendre aux résultats suivants :

Charge en algues : 100 kg/j (6,5 kg MSV)
Production de biogaz : 700 l/j à 75 % CH₄ (4 à 5 kwh)
Production de compost : 5 kg/j à 15 à 20 % MS.

Néanmoins, l'essai sur pilote de 150 litres devra être poursuivi et une étude socio-économique sera nécessaire pour déterminer la rentabilité réelle du projet. Il faut y intégrer notamment les données connues sur le coût de ramassage des algues (I. GNING, 1985) et tenir compte des autres aspects socio-économiques, en particulier, de l'acceptabilité de cette technique par les paysans-pêcheurs de la zone côtière.

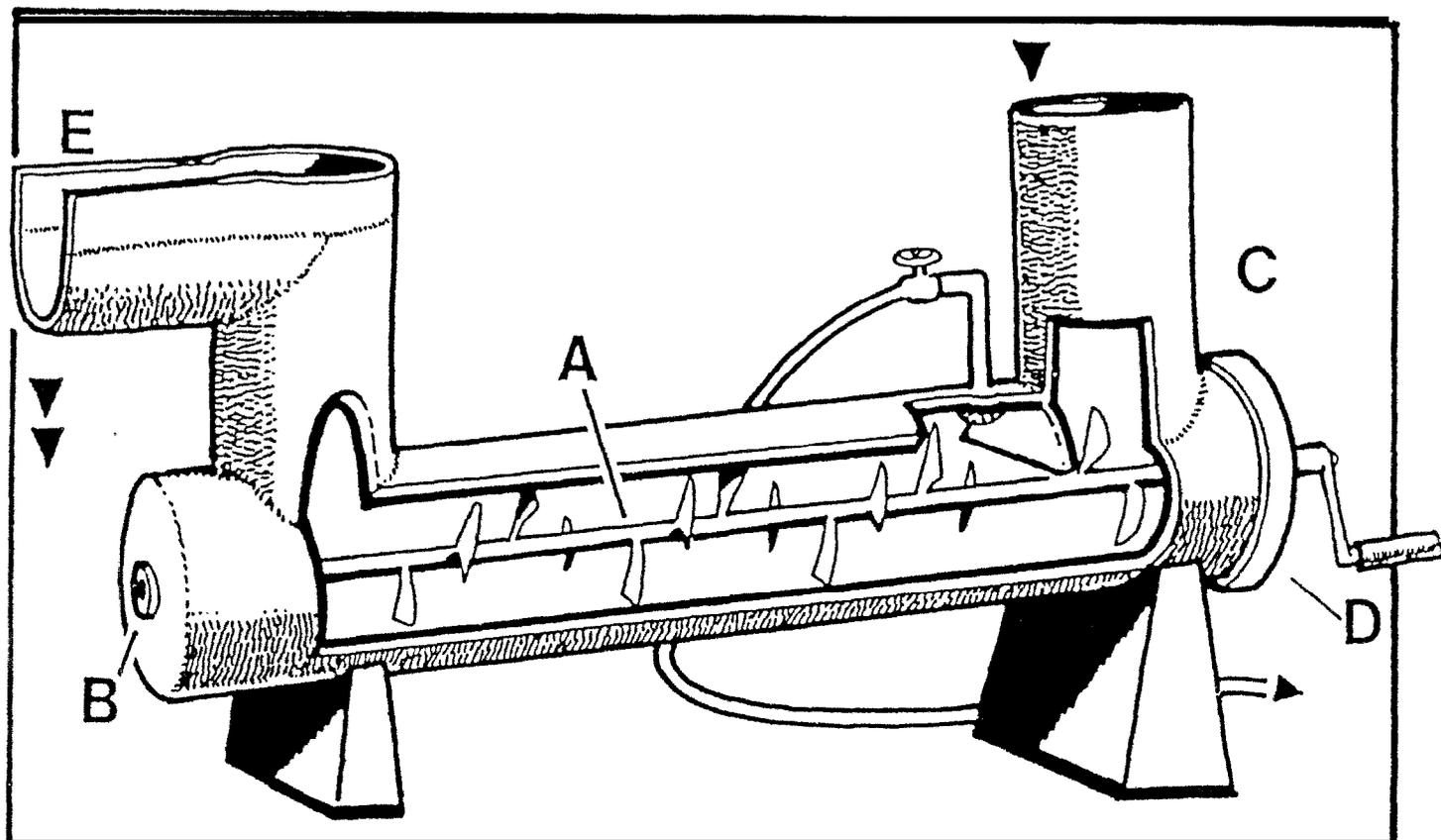
Enfin, l'étude complète de la fermentation méthanique des macrophytes marins doit se poursuivre suivant deux nouveaux axes de recherche : en micro-biologie il est nécessaire d'isoler et d'identifier les bactéries fermentaires, et en priorité, les méthanogènes présentes dans le biotope d'origine, la mangrove, puis celles qui se sont progressivement adaptées à la dégradation des algues ; en biotechnologie, l'effort futur devra porter sur la conception d'un fermenteur à deux **étages**, comportant une première cuve dans laquelle se fera la phase d'acidification, une seconde cuve, alimentée en continu, où la méthanisation se ferait dans les conditions optimales définies lors de la fin de l'essai en continu (phase VI).

B I B L I O G R A P H I E

- BROUARD (F.), 1983.- Digestion anaérobie de la biomasse végétale aquatique. Thèse de Docteur ingénieur - 120 p. TOULOUSE.
- BROUARD (F.), BORIES (A.), SAUZE (F.), 1982.- *Advances in anaerobic digestion of aquatic plants*. 2nd E.C. - Conference Energy from Biomass - Berlin 20-23 sept. 82. A Strub, C Chartier, G Schleser - Applied Science Publishers. 334.339.
- BINOT (R.A.), MARTIN (D.), NYNS (J.F.), NAVEAU (M.), 1978.- Digestion anaérobie d'algues cultivées dans des eaux de refroidissement - Séminaire "Heliosynthèse et aquaculture". MARTIGUES, 20-23 nov. 1978.
- GNINGUE (I.), 1985.- Les algues marines du Sénégal étude de leur action fertilisante en cultures maraîchères. Thèse de Docteur ingénieur 100 p. DAKAR.
- LECLERCQ (S.), PETITCLERC (A.), 1984.- Recherche sur la production de biogaz et de compost à partir des déchets d'abattoirs. Doc. ronéo 40 p. ORSTUM-DAKAR.
- MOLLION (J.), 1975.- Etude quantitative d'une formation végétale marine de l'infralittoral supérieur au Sénégal. Bulletin de l'IFAN T.37 Série A.
- MOLLION (J.), 1979. L'exploitation des algues au Sénégal : Situation actuelle et perspectives. Bull. Assoc. Avancement Sci. nat. Sénégal 67.
- MOLLION (J.), 1983.- Production de biogaz à partir d'algues marines, les recherches dans le monde et les potentialités du Sénégal. Chimie marine pour le développement, Environnement africain. ed. T.M. KORNPROBST.
- RYTHER (J.H.) et al., 1980.- *Studies on biomass and biogas production by aquatic macrophytes*. in. : Proc. Bio. energy. April 21-24, 1980, p. 130-133.
- TROJANO (R.A.), WISE (D.L.), AUGENSTEIN (D.C.), KISPERT (R.G.), 1976.- Fuel gas production by anaerobic digestion of kelp - Res. Rec. conserv., 2, 171-176.
- WISE (D.L.), AUGENSTEIN (D.C.), RYTHER (J.M.), 1979.- Methane fermentation of aquatic biomass - Res. Rec. conserv. 4, 217-237.

ANNEXE

Schéma du pilote de fermentation méthanique de 150 litres



Le pilote a été construit à l'aide d'un tuyau de PVC (B) de diamètre 30 cm, percé en deux endroits pour l'entrée (C) et la sortie (E) des algues, réalisés en collant deux tronçons du même tuyau au corps du fermenteur comme des "cheminées". Les bouts (B et D) sont fermés par des couvercles métalliques et l'étanchéité obtenue avec de la pâte à joint et complétée par des bandes de caoutchouc (chambre à air). L'agitation est assurée par la rotation d'un axe (A) sur lequel sont soudées 10 pâles en forme d'hélice.

Après 1 mois 1/2 de fonctionnement, on introduit quotidiennement 500 g d'algues sèches (à 60% MSV) dans le fermenteur qui produit 30 litres de biogaz par jour. On obtient dès six semaines un rendement massique de 100 litres de biogaz/kg MSV et un rendement volumique de 0,2 vol.gaz/vol utile de ferm./j.

T A B L E D E S T A B L E A U X

- 1 - Composition du mélange *Ulva, Hypnea, Cladophora* en % du poids sec.:
- 2 - Composition entre la composition moyenne des algues et le contenu de panses de bovins en % du poids sec.
- 3 - Composition en % du poids sec d'algues pures et mélangées
- 4 - Résultats de fermentation discontinue des algues
- 5 - Résultats de fermentation discontinue des algues
- 6 - Essais discontinus : Rendements massiques en biogaz et CH₄
- 7 - Comparaison des rendements massiques de fermentation de divers algues.
- 8 - Résultats de fonctionnement du fermenteur en continu sur 145 jours par tranches de 5 jours.
- 9 - Résultats de fonctionnement du fermenteur en continu pendant les 6 phases
- 10 - Résultats de fonctionnement du fermenteur en continu pendant la phase V
- 11 - Analyse du compost - % du poids sec.

NOTE FINALE

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un accord de coopération passé entre l'ORSTOM, l'ENSUT et l'ISRA-CRODT. Les auteurs remercient M. V. JACQ et J.L. GARCIA (ORSTOM) Mme GNING et J. PAGES (CRODT) pour leurs conseils scientifiques, Mr J. CHANUT (ORSTOM, moyens analytiques) pour les analyses de composition).

Les dessins sont de Richard Maurice du Service audiovisuel de l'ENSUT.

ORSTOM : Institut Français de Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération.

CRODT : Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye.

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agronomiques

ENSUT : Ecole Nationale Supérieure Universitaire de Technologie.